

## 高エネルギー重荷電粒子の核破砕反応による核種生成の断面積と生成放射能の物質内分布に関する研究

著者	八島 浩
号	3153
発行年	2003
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8425">http://hdl.handle.net/10097/8425</a>

氏 名	やしまひろし 八 島 浩
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	高エネルギー重荷電粒子の核破砕反応による核種生成の断面積と生成放射能の物質内分布に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 馬場 護
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 馬場護      東北大学教授 笹尾眞實子 東北大学教授 石井慶造      東北大学名誉教授 中村尚司

## 論 文 内 容 要 旨

現在、医学や理工学研究を目的として、高エネルギー重イオン加速器施設が建設されている。これらの重イオン加速器施設の安全管理においては加速器や施設構造材に生じる誘導放射能を評価するために、高エネルギー重イオンによる核破砕生成核種の生成断面積データが必要となる。陽子入射については核種生成断面積に関する系統的研究が行われているが、重イオン入射についてはいくつかの核種生成断面積に関する研究が行われているもののまだ断片的で実験データが不足している。そこで本研究では、高エネルギー荷電粒子の核破砕反応による核種生成断面積の系統的な実験データを取得し、その結果に基づいた高エネルギー重イオン加速器施設の誘導放射能評価に役立つ知見を得ることを目的として照射実験を行い、高エネルギー荷電粒子入射によって生成する核種の生成断面積及び誘導放射能の系統測定を行った。

照射実験は放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) で行った。本研究ではスタックフォイル法を用いてターゲットを作成した。銅板を重ねてターゲットとし、銅板の間に誘導放射能を測定するための放射化試料(Cu, C, Al, Cr, Fe, Ni, Pb)を挿入した。Ne(400, 230, 100 MeV/nucleon), C(400, 230, 100 MeV/nucleon), He(230, 100 MeV/nucleon), p(230, 100 MeV), Ar(400, 230 MeV/nucleon), Si(800 MeV/nucleon)各イオンをターゲットに照射して、ターゲット表面での核種生成断面積とターゲット内で生成した放射性核種の空間分布を求めた。生成核種の半減期を考慮して、一つの入射粒子に対して、短時間と長時間の 2 回の照射を行った。照射終了後、放射化試料に生成した放射性核種から放出される  $\gamma$  線を高純度 Ge 検出器で測定した。高純度 Ge 検出器で測定された  $\gamma$  線スペクトルから生成核種のピーク面積を求め、高純度 Ge 検出器の検出効率、サム効果、照射中のビーム強度変動による補正を加えて、核種の生成率を求めた。ターゲット表面の放射化試料における核種生成率から核種生成断面積、ターゲット内部の放射化試料における核種生成率から生成放射能のターゲット内空間分布をそれぞれ求めた。また、2 次粒子による生成が無視できる生成核種については、ターゲット内部の放射化試料の結果にターゲット内部での入射粒子のエネルギー減少と入射粒子束減衰を補正して、励起関数を求めた。

本実験の結果、銅試料からは 40 核種、炭素試料からは 2 核種、アルミニウム試料からは 4 核種、クロム試料からは 16 核種、鉄試料からは 26 核種、ニッケル試料からは 29 核種、鉛試料からは 9 核種について核種生成断面積を求めることができた。これまでに行われた他の実験結果と本結果を比較したところ、全体的に良く一致しており本実験方法による測定は十分な精度を持っていることが確認できた。この実験で最も多くの生成核種が同定できた銅試料について同重体の生成断面積を加え合わせて生成核種の質量数分布を求めた。どの入射粒子でも親核の銅に近い質量数の核種の生成断面積が大きくなっており、生成核と親核との質量数差が大きくなるにつれて生成断面積が減少している。 $^7\text{Be}$  のような非常に質量数の軽い核種は核破砕反応での蒸発過程で生成しやすいためと、C より重い入射粒子の場合では蒸発過程からの生成や target fragment としてだけでなく、projectile fragment としても生成するた

めに生成断面積が増加している。生成核種の質量数分布の入射粒子、エネルギー依存性は親核との質量数差の大きい核種ほど大きくなっている。また、銅試料に生成した核種の銅ターゲット内での生成放射能分布を得た。誘導放射能の銅ターゲット内空間分布もまた生成核種と親核との質量数差に依存している。(図 1 参照)質量数差が大きい核種は、生成するためのしきいエネルギーが大きく、そのほとんどが入射粒子によって生成される。そのためエネルギーの大きい粒子は飛程近くまで多くのエネルギーを持っているのでほぼ一定の放射能分布となり、エネルギーの小さい粒子はターゲット内でのエネルギーの低下とともに放射能分布も減衰している。質量数差が小さい核種はしきいエネルギーが小さいため、2次粒子による生成の寄与が大きくなる。生成放射能はターゲットの奥にいくにつれて増加し、飛程の先にも放射能が分布している。また、入射粒子が重くなると、入射粒子から生成したプロジェクトイルフラグメントは入射粒子とほぼ同じ核子あたりエネルギーを持ち、入射粒子よりも飛程が長いので飛程の先に大きな放射能分布を持つようになる。本実験結果から高エネルギー荷電粒子による核種生成断面積、生成放射能は入射粒子の質量数には必ずしも比例しておらず、親核と生成核種との質量数差に大きく依存することがわかった。

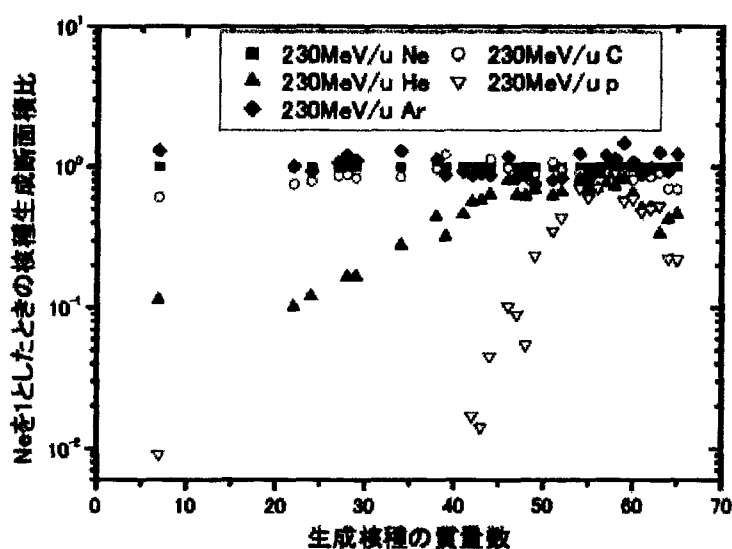


図 1 Ne 入射での核種生成断面積を 1 としたときの核種生成断面積比

本研究の実験結果を用いて、重イオン輸送モンテカルロコード PHITS の誘導放射能分布と核種生成断面積の計算精度の検証を行った。PHITS コードによる誘導放射能計算は全体的にファクター2~3 で実験値と良い一致を示した。

また、実験結果を用いて、銅に生成する核種の生成断面積、銅ターゲット全体に生成する放射能及びその放射能からの $\gamma$ 線線量を評価した。銅ターゲット実験で得られた断面積の質量数分布を半経験的基礎式にフィットしてパラメータを求め、測定できなかった核種の核種生成断面積を求めた。計算した断面積は実験値と大体ファクター3 以内で一致した。未測定の核種の結果を加えた質量数分布の傾きのエネルギー依存性を調べ、約 1 GeV 以上では傾きが一定となり、limiting fragmentation が起こっていることを確認できた。実験で得られた銅ターゲット内での生成放射能の空間分布から銅ターゲット中での生成放射能  $A_t$  を求めた。 $A_t$  を銅ターゲット表面での生成放射能  $A_i$  と入射粒子の飛程  $R$  で割ることにより、ターゲット内での生成放射能増加(減少)率を表す  $f$  ファクターを求めた。 $f=1$  のときは生成放射能はほぼ一定で飛程まで分布しているが、 $f<1$  のときはターゲット内で放射能が減少し、 $f>1$  のときはターゲット内で放射能が増加し飛程の先まで分布していることを示す。得られた  $f$  ファクターを2次または3次の指数関数でフィットした。フィッティングで得られた  $f$  ファクターを用いて評価した誘導放射能は実験値と大体ファクター3 以内で一致した。生成した誘導放射能のほとんどを銅に質量数の近い核種が占め、誘導放射能は核子あたりのエネルギーが大きいほど大きくなり、同じ核子あたりエネルギーで

は飛程が長いほど大きくなっている。(図 2 参照)得られた銅ターゲット中の生成放射能からの $\gamma$ 線の実効線量を銅ターゲット内での $\gamma$ 線の減衰を考慮して評価した。実効線量の入射粒子、入射エネルギー依存性は誘導放射能と似た傾向を示している。

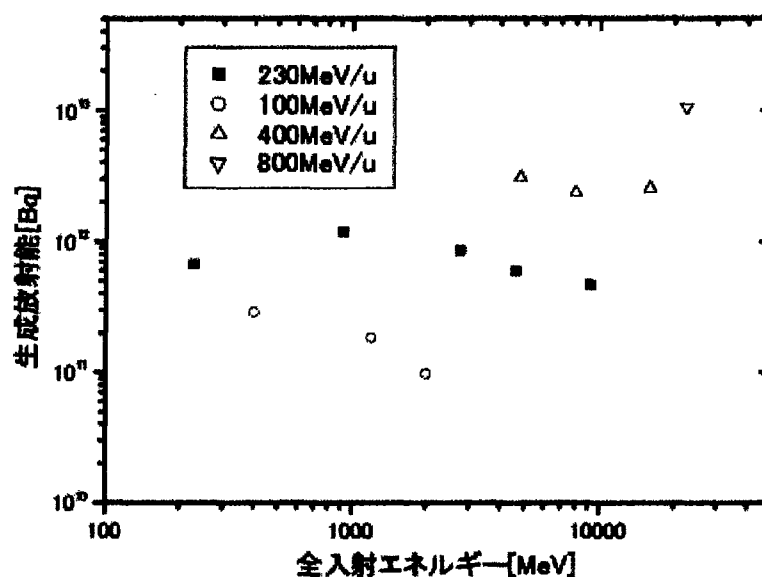


図 2 高エネルギー荷電粒子照射による銅ターゲット中の生成放射能の入射粒子依存性

本研究によって、高エネルギー荷電粒子による誘導放射能の系統的な実験データの取得及び高エネルギー荷電粒子によって銅に生成する核種の核種生成断面積、誘導放射能と放射能による線量の評価を行うことができた。本研究で得られた成果は高エネルギー重イオン加速器施設の安全設計や高エネルギー重イオン核反応計算コードのベンチマークデータとして非常に有用である。

# 論文審査結果の要旨

本論文は、現在国内外で建設や建設計画が進められている重粒子加速器の安全設計・安全管理に不可欠な放射性核種の生成とそれによる物質内の放射能分布を実験的に評価し、考察を加えたもので全7章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章は実験手法に関するもので、重粒子核反応による放射性核種生成のエネルギー依存性と放射能空間分布を測定するために本研究で新たに考案したスタックターゲット法について説明し、手法の妥当性を検証している。

第3章では実験データの解析手法を述べている。放射性核種の測定と同定には放射化法を用い、スタックターゲットの結果を用いて核種生成断面積のエネルギー依存性及びターゲット体系内での放射能分布を求める手法を示している。

第4章では放射性核種生成の実験結果を提示し、考察を加えている。本研究では、核子あたり100 MeV から800 MeV までの陽子、ヘリウム、炭素、ネオン、シリコン、アルゴンの入射粒子が、銅、炭素、アルミニウム、クロム、鉄、ニッケル、鉛に入射した場合の生成核種とその分布をエネルギーの関数として系統的に求めている。銅ターゲットの場合49核種、他核種ターゲットでも2から29核種について生成断面積が求められており、このような系統的なデータは本研究で初めて得られたもので重要な成果である。

又、本研究のデータによって、生成核種の入射粒子とそのエネルギー及びターゲット核への依存性・系統性及びターゲット内での放射能分布を明らかにし、生成する放射能が核種数に比例するという従来用いられてきた仮定が正しくないことを事実で示した。これも安全設計に影響を与える有用な成果である。

第5章では、本研究の結果を利用して、最近開発され今後の応用利用が期待される重イオン輸送コードPHITSの計算精度を評価している。PHITSは特殊な場合を除き、おおむね因子2-3程度で実験で求められた誘導放射能値を再現することを明らかにしている。

第6章では、銅を実際に加速器ターゲットとして使用した場合、ターゲット中に蓄積する放射能を予測し、表面での放射線線量を予測している。実験で測定されていない核の寄与を質量分布の半実験式を実験値にフィットして評価し、それを用いて放射能強度と放射線線量を明らかにした。これも工学的に有用な知見である。

第7章は総括である。

以上、要するに本論文は重イオン核反応に伴う放射性核種の生成断面積とそれによる放射能の物質内分布を実験的に初めて明らかにしたもので、量子エネルギー工学の進展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。